

21/09/2009



Rapport CNAB 2005-2009

Cosmochimie, Datation & Géochimie Environnementale



CNAB – UMR 5084

Cosmochimie, Datation & Géochimie Environnementale

Recherches menées à partir de l'analyse de gaz rares (stables et radioactifs) par la spectrométrie de masse de très haute sensibilité dans différents types de matériaux tels que : la matière extraterrestre et les cibles irradiées (histoire des météorites et du rayonnement cosmique), les eaux souterraines anciennes et les glaces polaires (datation), la rétention et la diffusion des gaz dans les matériaux de confinement des déchets radioactifs et dans le combustible nucléaire.

Bilan scientifique détaillé

COSMOCHIMIE, DATATION & GÉOCHIMIE ENVIRONNEMENTALE

Recherches menées à partir de l'analyse de gaz rares (stables et radioactifs) par la spectrométrie de masse de très haute sensibilité dans différents types de matériaux tels que : la matière extraterrestre et les cibles irradiées (histoire des météorites et du rayonnement cosmique), les eaux souterraines anciennes et les glaces polaires (datation), rétention et diffusion des gaz dans les matériaux de confinement des déchets radioactifs et dans le combustible nucléaire.

Composition de l'équipe

Permanents	Eric GILABERT Bernard LAVIELLE	CR1 DR2
	Bertrand THOMAS	IR2
Non Permanents	Véronique LAVASTRE Thomas SMITH	PD (CNRS 2005)/ IR CDD (ANR 2008) Doctorant (depuis octobre 2007)

Les recherches du groupe « *Cosmochimie, Datation & Géochimie Environnementale* » ont été menées au cours des 4 dernières années conformément aux axes principaux définis dans le cadre du contrat quadriennal en cours 2007-2010.

On distinguera 5 axes de recherches principaux :

- Axe 1 : Datation des eaux souterraines anciennes du site de Meuse/Haute Marne et datation des glaces polaires*
- Axe 2 : Propriétés de diffusion des gaz rares à l'échelle des formations géologiques des sites dédiés à l'étude du stockage des déchets nucléaires*
- Axe 3 : Caractérisation et évolution temporelle de la zone endommagée des galeries résultant de leur excavation dans les formations argileuses.*
- Axe 4 : Comportement des gaz rares dans UO₂ et Mo par Thermo-Désorption couplée à la Spectrométrie de masse.*
- Axe 5 : Histoire des météorites et évolution passée du rayonnement cosmique*

Le projet relatif à l'axe 1 a été techniquement et financièrement très lourd à gérer avec notamment la conception et la réalisation de plusieurs lignes d'extraction et de purification des gaz, et de 3 spectromètres de masse prototypes pour un budget total de plus de 460 000 € HT. Ce développement a représenté une charge de travail considérable pour l'équipe composée seulement de 3 permanents (2 chercheurs et un ingénieur de recherche) dont Bernard Lavielle qui a assuré parallèlement depuis le 01/01/2006 la lourde fonction de la direction de l'Unité. Un post-doc est également venu pendant 18 mois entre 2005 et 2009 compléter l'équipe. La mise en œuvre des axes 2 et 3 a également nécessité beaucoup d'investissement du fait de l'évolution thématique amorcée en 2003-2004 après de nombreuses années consacrées essentiellement à l'étude des météorites et du rayonnement cosmique. En premier lieu, il a fallu maîtriser toutes les procédures d'échantillonnage, qui étaient nouvelles pour le groupe et particulièrement délicates, impliquant de nombreuses missions de terrain sur des sites éloignés (Meuse/Haute Marne, Mont Terri en Suisse et Tournemire dans l'Aveyron, Tchernobyl). D'autre part ce type d'échantillons (eau ou d'argile) doit faire l'objet de procédures d'analyse très spécifiques que nous avons du mettre au point dans des délais assez courts afin d'être en phase avec les campagnes de forages.

Si aujourd'hui tous ces développements sont maîtrisés ou proches de l'être, cela a eu une conséquence directe sur la production de l'équipe en terme de nombre de publications au cours de ces dernières années. Cela va bien sûr constituer une priorité pour 2010 afin de valoriser le travail considérable qui a été effectué.

L'axe 4 propose une application très intéressante du savoir faire acquis dans l'analyse des gaz rares depuis de nombreuses années, apportant une approche quantitative originale à l'étude des processus de diffusion dans le combustible nucléaire ou les matériaux envisagés pour la nouvelle génération de centrales nucléaires.

Enfin l'axe 5, même s'il a été occulté ces dernières années par les recherches menées dans le domaine du nucléaire, reste un thème pour lequel l'équipe a acquis une reconnaissance internationale qu'il est absolument essentiel de consolider notamment par les perspectives que nous offre le nouveau spectromètre FAKIR pour l'étude d'échantillons rares comme les météorites martiennes ou lunaires ou provenant de missions spatiales futures.

Axe 1 : Datation des eaux souterraines anciennes du site de Meuse/Haute Marne et datation des glaces polaires (2.101, 2.102, 2.103, 2.104, 2.110, 2.114, 2.117, 2.129)

Ce projet a débuté en 2004 avec le soutien initial de l'Andra et du GdR FORPRO. La mesure de l'âge des eaux souterraines sur un site comme celui de Meuse/Haute Marne permet de déterminer les vitesses de circulation des eaux dans les aquifères adjacents à la couche d'argile envisagée comme hôte des déchets nucléaires. Ces données sont essentielles pour évaluer en termes de sûreté le stockage sur le long terme.

La méthode de datation proposée par notre équipe est considérée comme la plus adaptée aux eaux anciennes, mais constitue un défi technologique particulièrement difficile à relever. Elle est basée sur la mesure de l'isotope radioactif ^{81}Kr produit par l'interaction du rayonnement cosmique avec les isotopes de krypton présents dans l'atmosphère terrestre. Du fait de la grande inertie chimique des gaz rares et de la taille considérable du réservoir atmosphérique, la concentration de ^{81}Kr s'avère peu sensible aux variations d'intensité du rayonnement cosmique. On estime qu'elle est en équilibre dans l'atmosphère au moins depuis plusieurs millions d'années. Le ^{81}Kr se trouve ensuite isolé du réservoir atmosphérique après sa dissolution dans une eau souterraine ou après son piégeage dans des micro-bulles dans la glace polaire. Il décroît alors avec une période de 229 000 ans permettant ainsi des mesures d'âge dans une gamme de temps allant de 50 000 à 1 million d'années. Sa production dans le milieu souterrain ou dans la glace étant négligeable contrairement à ^{36}Cl par exemple, son abondance permet ainsi une mesure directe du temps de résidence dans l'eau ou dans la glace.

La validité de la méthode a été démontrée en 1990 grâce à des mesures réalisées à l'aide d'un spectromètre de masse couplé à un accélérateur de particules. Du fait de l'abondance extrêmement faible de ^{81}Kr , qui est de l'ordre de 1 200 atomes par litre d'eau ou de glace, plus de 16 tonnes d'eau furent nécessaires pour cette étude. Plus récemment une équipe américaine d'Argonne National Laboratory a pu, en utilisant une détection de ^{81}Kr par fluorescence (technique ATTA), réaliser une datation d'eau souterraine en traitant un volume de 800 litres d'eau. Comme de tels volumes d'échantillons ne sont pas compatibles avec les contraintes d'échantillonnage des sites que nous étudions du fait de la faible productivité des aquifères, nous avons fixé comme objectif de pouvoir réaliser une datation avec moins de 20 l d'eau. De ce fait, nous avons donc entrepris la conception, la réalisation et la mise en œuvre des appareillages suivants :

- une ligne permettant l'extraction et la purification du krypton de 20l d'eau souterraine
- un spectromètre de masse pour effectuer l'enrichissement isotopique des isotopes radioactifs du krypton : ^{81}Kr (période 229 000 ans) et ^{85}Kr (10,77 ans) dont le développement a été financé par l'ANR (projet DEG : Datation des Eaux et des Glaces).
- un spectromètre de masse de très haute sensibilité permettant l'analyse isotopique d'échantillons contenant seulement quelques milliers d'atomes de Kr. Une telle sensibilité représente un gain

d'environ 2 ordres de grandeur par rapport aux meilleurs spectromètres de masse conventionnels actuellement disponibles commercialement. Cet instrument a été baptisé FAKIR (Facilité pour l'Analyse du Krypton et de ses Isotopes Radioactifs). Il utilise une ionisation résonante du Kr par un faisceau laser UV énergétique et un concentrateur cryogénique pour augmenter la sensibilité. L'analyse en masse est faite par temps de vol.

La ligne d'extraction et le spectromètre FAKIR sont aujourd'hui complètement opérationnels au niveau requis pour réaliser la datation des eaux souterraines. Le spectromètre de masse dédié à l'enrichissement isotopique est également en fonctionnement, mais nécessite encore un certain nombre d'améliorations pour atteindre le niveau de performance voulu, niveau que nous espérons atteindre avant la fin 2009.

Nous envisageons de mettre en œuvre prochainement d'autres applications très intéressantes basées sur la mesure de l'isotope ^{85}Kr (10,77 ans) qui également très peu abondant dans l'atmosphère. Ces applications concernent le nucléaire civil (émissions liées au retraitement des déchets ou étude de sites contaminés comme Tchernobyl) et le nucléaire militaire (contrôle de la non-prolifération des armes nucléaires). C'est la raison pour laquelle ce type de développement fait aujourd'hui l'objet d'une concurrence très forte notamment par le laboratoire d'Argonne qui met depuis une dizaine d'années des moyens importants sur le projet ATTA dont il est le porteur.

Ce développement complexe a pu être réalisé grâce à des financements multiples pour un montant total de 462 815 euros HT et qui sont résumés par le tableau ci-dessous :

Montants en euros HT	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Andra	25 000							
GNR FORPRO	25 000							
CNRS – Chimie		30 000						
SDU-INSU		30 000						
Région Aquitaine			52 000	108 000				
SDU(Océan Atmosphère)				20 000				
Université Bx 1 (PPF)		25 084						
Université Bx 1 (BQR)			12 542					
ANR – blanc (DEG)						80 693	25 000	28 800
Total / an	50 000	85 084	64 542	128 696		80 693	25 000	28 800

Axe 2 : Propriétés de diffusion des gaz rares à l'échelle des formations géologiques des sites dédiés à l'étude du stockage des déchets nucléaires (2.007, 2.115)

Une première étude a été réalisée lors de la campagne de forages 2003-2004 pilotée par l'Andra autour du site du laboratoire souterrain de Meuse/Haute Marne. Trois formations géologiques étaient ciblées : la couche argileuse du Callovo-Oxfordien qui abrite le laboratoire souterrain à environ 500 mètres de profondeur, les formations calcaires adjacentes de l'Oxfordien (au dessus) et du Dogger (en dessous). Des prélèvements d'eau effectués à différentes profondeurs dans les deux aquifères ont permis de montrer par la mesure des concentrations des gaz rares (Ne, Ar, Kr, Xe) que les températures moyennes lors de la recharge des eaux de l'Oxfordien se situaient entre 3°C et 11°C, caractéristiques d'une période froide.

Dans le cadre de cette étude des efforts très importants ont été réalisés au sein de l'équipe pour mettre au point les techniques d'extraction et d'analyse des gaz rares dissous dans les eaux porales des argiles. Ce savoir faire a été pleinement utilisé lors de la deuxième campagne de forage de l'Andra (2007-2008) visant à étudier la zone dite de transposition située à quelques kilomètres au nord-ouest du laboratoire souterrain et susceptible d'accueillir le futur site de stockage des déchets nucléaires. Cette étude est menée dans le cadre du projet TDC (Transferts par Diffusion et Convection) soutenu par l'Andra et le GdR FORPRO, porté par les laboratoires **CNAB** (Bernard LAVIELLE) et GIS/CEREGE (Corinne LE GAL LA SALLE). Il est mené en collaboration avec les laboratoires IDES, LSCE, et CAREN dans le but d'associer toute une palette de traceurs géochimiques radioactifs (^{81}Kr

($T_{1/2} = 229$ ka), ^{36}Cl (301 ka), ^{14}C (5,73 ka), ^3H (12,3 a), ^{85}Kr (10,73 a), et stables (He, Ne, Ar, Kr, Xe, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{34}\text{S}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, ^{37}Cl , ^{81}Br) ainsi que et des traceurs de pollution anthropique (CFC, SF_6). Une cinquantaine d'échantillons d'argilite a été extraite par le CNAB de carottes réalisées à partir de 4 forages ciblant le Callovo-Oxfordien afin d'analyser l'abondance des gaz rares en fonction de la profondeur. L'objectif est de modéliser la diffusion des gaz rares et en particulier de l'He radiogénique à travers les formations géologiques recoupées et de regarder la variabilité à l'échelle du secteur. Cette étude, dont la partie analytique est maintenant pratiquement terminée, fait l'objet d'une thèse (Thomas SMITH) dans le cadre d'une convention passée avec l'Andra.

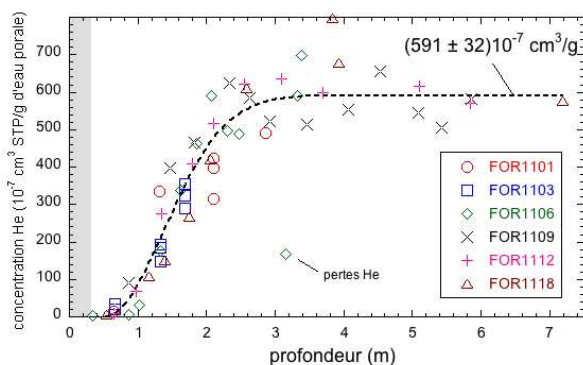
Pour l'un des forages, l'Andra a mis en œuvre des carottages jusqu'à une profondeur d'environ 2000 m afin d'échantillonner les formations plus profondes du Lias et du Trias. Ce travail est mené avec le soutien du GNR FORPRO II et de l'Andra dans le cadre d'une collaboration regroupant les laboratoires (CNAB, GIS/CEREGE, IDES, CAREN). Le CNAB a prélevé 29 échantillons à différentes profondeurs entre 750 m et 2000 m qui sont en cours d'analyse. Ces mesures devraient apporter des informations importantes sur les contributions, au niveau du Callovo-Oxfordien et du Dogger, des gaz provenant des formations plus profondes et ainsi conduire à une meilleure interprétation des données collectées jusqu'ici.

Outre son application sur le site de Meuse/Haute Marne, ^{85}Kr sera également mesuré pour évaluer l'impact de la contamination sur le site de Tchernobyl dans le cadre du GNR TRASSE.

Axe 3 : Caractérisation et évolution temporelle de la zone endommagée des galeries résultant de leur excavation dans les formations argileuses (2.109, 2.122, 2.128)

Ces recherches ont été menées sur trois des principaux sites européens dédiés à l'étude du stockage de déchets nucléaires en couches géologiques profondes : le site de Meuse/Haute Marne (Andra), et celui du Mont Terri (Suisse - consortium européen) avec le soutien de l'Andra et du GNR FORPRO et sur le site de Tournemire (Aveyron) avec le soutien de l'IRSN et du GNR TRASSE.

Après l'excavation de galeries, les caractéristiques des argiles situées en paroi se modifient jusqu'à des profondeurs de 2 à 3 mètres du fait de la désaturation en eau et de l'apparition de micro-fractures. Nous nous sommes tout d'abord intéressés au laboratoire souterrain de Meuse/Haute Marne où nous avons pu réaliser plusieurs études à l'aide des gaz rares afin de caractériser la zone endommagée et surtout de suivre son évolution dans le temps. Dès la fin de l'excavation, l'hélium radiogénique provenant de la désintégration de U et de Th présents dans les minéraux de l'argilite, diffuse en direction de la galerie et est ensuite évacué par les systèmes d'aération. Cette diffusion, qui est liée à l'apparition de micro-fractures dans la roche, se traduit par la mise en place d'un profil de concentration en fonction de la profondeur dans la paroi. Nous avons donc suivi pendant 18 mois l'évolution de la concentration des gaz rares en paroi du laboratoire souterrain de Meuse/Haute Marne à l'aide d'échantillonnages réalisés à partir de 7 forages espacés dans le temps (FOR11XX). Les données présentées par le graphe ci-après montrent que l'hélium constitue un excellent traceur de diffusion. Le profil de He s'est mis en place en moins de 45 jours (FOR1101) et est resté ensuite stable pendant toute la durée de l'étude.



Concentration de He en fonction de la profondeur pour les différents forages

Cela nous a amené à essayer de caractériser l'évolution de la zone endommagée sur des périodes plus courtes et donc avec une résolution temporelle meilleure. Ceci a été réalisé dans le laboratoire du Mont Terri où nous avons pu échantillonner une paroi respectivement 1 jour, 8 jours et 15 jours après l'excavation de la galerie. Ce travail a été mené dans le cadre du projet EZ-G-08 (GNR FORPRO) en collaboration avec les laboratoires Géosciences Rennes (UMR 6118), Géologie ENS Paris (UMR 8538), CUFR Nîmes (UMR 6635) ainsi que l'Institut Géotechnique de

Bern, Suisse et l'Université de Toronto, Canada. Ce projet a pour objectif le « Suivi multiéchelles et multiméthodes de l'apparition et de l'évolution à court terme de l'endommagement créé lors du creusement d'une nouvelle galerie dans l'argile à Opalinus du Mont-Terri ». Les résultats obtenus montrent bien l'évolution rapide de la zone endommagée, qui est visible à l'échelle de la semaine. De plus nous avons pu mettre en évidence dans une paroi plus ancienne une très bonne corrélation entre les pertes de He par diffusion et les fractures observées le long de la carotte montrant la grande sensibilité de He utilisé en tant que traceur.

Enfin dans la perspective d'un stockage de déchets sur de très longues périodes, il est important d'observer l'évolution de l'endommagement sur des temps longs. C'est le projet mené en collaboration avec l'IRSN (Jean-Michel MATRAY) sur le site de Tournemire. Le laboratoire souterrain s'est développé autour d'un ancien tunnel ferroviaire creusé, il y a plus de 120 ans dans une formation argileuse. De nouvelles galeries ont été creusées par la suite, il y a respectivement 11, 4 et 1 ans qui devraient permettre un suivi de l'endommagement sur plus d'un siècle en observant plusieurs stades de son évolution. Ce projet a débuté en septembre 2008 et va se poursuivre jusqu'en 2010. Il inclut également une étude des diffusions de gaz à l'échelle des formations géologiques du site. Des premiers résultats, très intéressants, ont été récemment obtenus montrant pour la première fois une double diffusion de l'He radiogénique produit par la désintégration de l'Uranium et du Thorium présents dans la formation argileuse du toarcien supérieur, d'une part en direction de l'aquifère calcaire sus-jacent et d'autre part induite par le creusement du tunnel.

Axe 4 : Comportement des gaz rares dans UO_2 et Mo par Thermo-Désorption couplée à la Spectrométrie de masse (2.002, 2.005)

Ce travail est mené en collaboration avec le CNRS-CEMTHI Orléans et le CEA/Cadarache.

La désorption thermique des gaz rares nous a permis de démarrer, il y a 6 ans une thématique concernant l'étude des matériaux de l'industrie électronucléaire. Une première série d'étude concerne le relâchement de 3He dans UO_2 (réseau ACTINET 2004-2008) et dans le Mo (collaboration avec le CEA Cadarache). Enfin, un programme européen (F-BRIDGE 2008-2012) va permettre d'étendre l'étude du comportement des gaz rares aux combustibles de nouvelle génération.

L'hélium dans UO_2

L'étude de la désorption thermique de l'hélium dans UO_2 s'inscrit dans le cadre du réseau d'excellence ACTINET qui a mis en place un groupement de laboratoires européens qui partagent un intérêt dans l'étude et la modélisation des éléments volatils dans l'oxyde d'uranium. Notre participation concerne l'étude des processus de diffusion et de relâchement dans des échantillons préalablement implantés ou infusés.

UO_2 est le principal combustible utilisé au sein du parc électronucléaire français. Pendant son séjour en réacteur, le combustible subit d'importantes modifications chimiques et structurales dues à l'énergie de fission libérée par l'uranium et à la radioactivité α des produits de fission engendrés. Cette activité α conduit à l'accumulation d'importantes quantités d'hélium au sein du combustible. Afin de prévoir le comportement de UO_2 irradié dans le réacteur et lors de son stockage à long terme en tant que déchet, il est capital d'identifier les mécanismes qui régissent le comportement et la migration de l'hélium dans la matrice UO_2 . L'étude de l'hélium dans UO_2 (ainsi que dans le molybdène) requiert une procédure expérimentale en trois étapes. Tout d'abord, l'hélium est introduit ou généré dans les échantillons à étudier. Ensuite, les échantillons subissent un cycle thermique afin d'activer la diffusion au sein du matériau. Enfin, un bilan de l'hélium présent dans le matériau ou relâché est effectué pendant le recuit.

Pour analyser le comportement de l'hélium, à basse fluence nous utilisons une ligne de spectrométrie de masse haute sensibilité couplée à un dispositif de relâchement des gaz pouvant atteindre 1 350 °C. Les résultats obtenus montrent que la modélisation ne peut se faire avec un coefficient de diffusion uniforme. En effet, les courbes de relâchement font apparaître clairement 2 processus qui prennent place au cours du recuit. Pendant la première partie, les défauts d'implantation commencent à migrer et/ou à se recuire au voisinage des joints de grain. La diffusion rapide de l'hélium débute tandis que la

diffusion à l'intérieur des grains est encore peu importante. La deuxième partie montre la diffusion intragranulaire de l'hélium.

L'hélium dans Mo

Les études du relâchement de ^3He dans Mo s'inscrivent dans le cadre du renouvellement du parc électronucléaire dit de « génération IV ». L'objectif de ces analyses est d'étudier le comportement de l'hélium dans des matrices métalliques (Mo, W, W-Re et Mo-Re) de façon à assurer l'intégrité du liner. En collaboration avec le laboratoire LLCC de Cadarache, nous avons mis en place une étude de désorption dans des cibles de Mo préalablement implantées par des atomes d'hélium à différentes énergies et fluences. Comme pour UO_2 , l'utilisation de faibles fluences permet de « déconvoluer » les effets de doses et d'énergies dans les mécanismes de transport et de précipitation des espèces. Les échantillons analysés ont mis en évidence un phénomène de précipitation pour les hautes doses d'implantation et l'apparition de bulles. Les mécanismes de formation de bulles, les grandeurs physiques associées ainsi que la modélisation des interactions entre He et lacunes ont pu être précisés.

F-BRIDGE (Basic Research for Innovative Fuel Design for GEN IV systems).

Ce projet fait partie du 7^e Programme Cadre EURATOM-Fission et il se veut une continuité du réseau ACTINET avec pour but d'étudier de nouveaux combustibles pour les centrales dites de génération IV. Une partie de ce programme a pour objectif de caractériser expérimentalement les propriétés de transport et microstructure du combustible. Ce Work-package se concentre sur l'étude expérimentale des propriétés de transport de l'hélium, des produits de fission (Kr et Xe) et des impuretés dans les matériaux carburants (UO_2 , carbure d'uranium) et dans le revêtement en céramique. La connaissance de la nature des défauts est un élément clé de la prévision de la stabilité de la microstructure. Ces expériences sur le modèle du matériel nous permettront d'utiliser un large éventail de techniques de caractérisation qui sont impossibles à utiliser sur des échantillons irradiés ou qui ne peuvent pas apporter un aperçu précis des mécanismes de base en raison de la complexité et le nombre de phénomènes mis en jeu. Notre participation à ce programme concerne l'étude du relâchement des gaz rare He, Kr, Xe dans différents types de combustibles.

Axe 5 : Histoire des météorites et évolution passée du rayonnement cosmique (2.003, 2.004, 2.006, 2.104)

Compte tenu des développements très lourds, qui ont été menés au sein de l'équipe durant ces 4 dernières années, le volet *cosmochimie* qui constitue un des points forts de notre activité depuis plus de 20 ans, a été mis de côté pendant toute cette période. Nous avons pu cependant démontrer les performances extrêmement élevées de notre nouveau spectromètre FAKIR en analysant le Kr produit par le rayonnement cosmique dans plusieurs petits échantillons de météorites de fer (quelques dizaines de mg) et déterminer un temps d'exposition au rayonnement cosmique en excellent accord avec les données existante. En disposant maintenant d'un instrument capable d'effectuer des mesures en utilisant des échantillons de très petites tailles, nous allons dès 2010 commencer l'étude de météorites rares qui font l'objet de beaucoup d'intérêt de la part de la communauté internationale (météorites martiennes ou lunaires) et nous positionner sur les futurs programmes spatiaux de retour d'échantillons.

Séminaires

E. Gilibert

- 19 octobre 2005, CEA Cadarache
Détection des gaz rares à l'état de trace

B. Lavielle

- Société Astronomique de Bordeaux – janvier 2006
Développement d'une nouvelle technique d'analyse du krypton et du xénon en ultra-traces (technique RIS-TOF) et applications

- University of Bern – 24 janvier 2007
A new facility for measuring very small Kr samples and dating applications
- University of Manchester – 24 avril 2007
A new facility for measuring very small Kr samples and dating applications
- Laboratoire IDES, Orsay – 24 janvier 2008
Transport de gaz dans les formations de très faible porosité: étude des gaz rares en parois des laboratoires souterrains de Meuse - Haute Marne (Andra) et du Mont Terri (CH).

Workshop

- ACTINET, first JRP01-35 meeting, 23 novembre 2004, Paris
- ACTINET 2nd JRP01-35 meeting, 27 septembre 2005, Paris
- ACTINET 3rd JRP01-35 meeting, 27 avril 2006, Paris, France
- ACTINET 4rd JRP01-35 meeting, 11 octobre 2007, Paris, France
- F-BRIDGE, first meeting, 1-2 avril 2008, Saclay, France
- F-BRIDGE, Second meeting, 1-2 avril 2009, PSI, Suisse

Liste des DEA ou Master Recherche

« Master 1 Physique »

- Brou Céline, Prieur Thomas, Colas Damien (2007)
- Colas Damien (2008)
- Fauché Alain (2009)

« Master 2 Pro Physique »

Conception, utilisation et commercialisation de l'instrumentation de Physique

- Faye El Hadji, Antinoro Alain (2006)

« Master Sciences et Technologie Mention Chimie Moléculaire de l'Environnement »

Master Recherche 2ème année.

- Damien Neubauer (2006) « Extraction et purification du krypton présent dans les eaux souterraines ».
- Antony Yeun (2006) « Étude des gaz rares dans les eaux porales des matériaux argileux »
- Émilie Caupos (2007) « Séparation et purification des gaz rares dans les eaux souterraines ».

Collaborations

Les recherches menées par l'équipe s'appuient sur des collaborations nationales et internationales

- Andra – Laboratoire Souterrain de Meuse / Haute Marne
- CEA/Cadarache & CEA/Saclay (LSCE)
- CNRS-CEMTHI Orléans
- IRSN- Fontenay aux roses
- University of Berkeley (Space Sciences Laboratory),
- University of San Diego (Department of Chemistry & Biochemistry),
- University of Bern (Physikalisches Institut)
- Université de Nîmes (GIS/CEREGE),
- Université de Paris-Sud (IDES)

Liste des publications et productions

PUBLICATIONS

		COSMOCHIMIE, DATATION & GÉOCHIMIE ENVIRONNEMENTALE	
ACL	2.001	Dating groundwaters with ^{36}Cl , ^{14}C , ^3H , and noble gases: a case study in the eastern Paris Basin, France <u>Véronique Lavastre</u> , Corinne Le Gal La Salle, Lucilla Benedetti, Jean-Luc Michelot, <u>Sophie Giannesini</u> , <u>Bertrand Thomas</u> , <u>Eric Gilabert</u> , <u>Bernard Lavielle</u> , Didier Bourlès, Joël Lancelot Applied Geochemistry (à paraître 2010)	
	2.002	Behaviour of helium after implantation in molybdenum C. Viaud, S. Maillard, G. Carlot, C. Valot, <u>E. Gilabert</u> , T. Sauvage, C. Peauccelle, N. Moncoffre Journal of Nuclear Materials, 385 (2009) 294-298	
	2.003	Cross sections for the production of helium, neon and argon isotopes by proton-induced reactions on iron and nickel K. Ammon, I. Leya, <u>B. Lavielle</u> , <u>E. Gilabert</u> , J.-C. David, U. Herpers, R. Michel Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B266 (2008) 2-12	
	2.004	The complex exposure histories of the Pitts and Horse Creek iron meteorites : implications for meteorite delivery models K. C. Welten, K. Nishiizumi, <u>B. Lavielle</u> , M. W. Caffee, D. J. Hillegonds, R. C. Finkel, D. Kollar, J. Masari Meteoritics & Planetary Science, 43, (2008) 1321-1332	
	2.005	Study of radiogenic helium diffusion in the β -Thorium Phosphate Diphosphate ceramic A. Özgümüş, <u>E. Gilabert</u> , N. Dacheux, C. Tamain, <u>B. Lavielle</u> Journal of Nuclear Materials 373 (2008) 112-118	
ACLN	2.006	History of the Solar Environment Kurt Marti and <u>Bernard Lavielle</u> (2008) Proceedings IAU Symposium N° 257: Universal Heliophysical Processes (doi:10.1017/S1743921309029706)	
	2.007	Water geochemistry contribution to the understanding of the regional hydrogeological system Buschaert S., <u>Giannesini S.</u> , Benedetti L., <u>Lavastre V.</u> , Gaucher E. C., Lacroix M., <u>Lavielle B.</u> , Michelot J-L, France-Lanord C., Bourlès D., Finkel R., Lancelot J, Dewonck S, Vinsot A Société Géologique de France 178 (2007) 91-114	
ASCL	2.008	New RIS-TOF facility for measuring very small Kr and Xe gas samples <u>Lavielle Bernard</u> , <u>Gilabert Eric</u> , <u>Thomas Bertrand</u> , <u>Lavastre Véronique</u> Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement 70 (2006) 344	

CONFÉRENCES

		COSMOCHIMIE, DATATION & GÉOCHIMIE ENVIRONNEMENTALE	
INV	2.101	<u>Lavielle B.</u> 8 & 9 juillet 2009 Saclay, France Atelier GNR Paris 2009 - Sciences Analytiques : état de l'art et perspectives Développement d'une nouvelle facilité (FAKIR) pour la mesure des isotopes radioactifs ^{81}Kr (229 000 ans) et ^{85}Kr (10,7 ans) et applications.	
	2.102	<u>B. Lavielle</u> , <u>E. Gilabert</u> , <u>B. Thomas</u> , <u>V. Lavastre</u> 19 & 20 juin 2009 Nancy, France Workshop on Developments In Noble Gas Understanding and Expertise (DINGUE) Development of a new facility for dating old groundwaters and ice cores based on ^{81}Kr measurement	
	2.103	<u>B. Lavielle</u> , <u>E. Gilabert</u> , <u>B. Thomas</u> , <u>V. Lavastre</u> 28 février - 2 mars 2007 Postdam, RFA	

		4 th Mini Conference on Noble Gases in the Hydrosphere and Natural Gas Reservoirs (MiNoGa), GFZ Postdam, Germany Development of a new facility for dating old ground waters and ice cores using ⁸¹ Kr and ⁸⁵ Kr.
ACTI	2.104	<u>Bernard Lavielle</u> , <u>Eric Gilabert</u> , and K. Marti 13-18 juillet 2009 Nancy, France 72 nd Annual Meeting of the Meteoritical Society Solar Wind Isotopic Abundances in 2 mm Surface Layers of Arlington
	2.105	<u>Bernard Lavielle</u> , <u>Eric Gilabert</u> , <u>Bertrand Thomas</u> , and <u>Véronique Lavastre</u> 21-26 juin 2009 Davos, Suisse Goldschmid 2009 Development of a new facility for dating old groundwaters and ice cores based on ⁸¹ Kr measurement
	2.106	Kurt Marti and <u>Bernard Lavielle</u> 15-19 septembre 2008 Ioannina, Grèce IAU symposium 257: Universal Heliophysical Processes History of the Solar Environment
	2.107	C. Viaud, G. Carlot, S. Maillard, T. Sauvage, <u>E. Gilabert</u> , C. Peaucelle, N. Moncoffre 26-30 mai 2008 Strasbourg, France E-MRS 2008 Spring Meeting Behaviour of Helium in Molybdenum: Thermal release and precipitation from samples implanted from 60keV up to 420keV and 20ppm to 0.01% at.
	2.108	<u>E. Gilabert</u> , <u>B. Lavielle</u> , T. Sauvage, G. Martin, P. Garcia 11 octobre 2007 Paris, France ACTINET 4 th JRP01-35 meeting He desorption in uranium dioxide at low fluence irradiation.
	2.109	<u>B. Lavielle</u> , <u>B. Thomas</u> , <u>E. Gilabert</u> 17-20 septembre 2007 Lille, France 3 rd International Meeting: Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement Characterization and evolution of EDZ by extraction and analyses of noble gases in pore waters in the URL at the Meuse/Haute Marne site
	2.110	<u>B. Lavielle</u> , <u>E. Gilabert</u> , <u>B. Thomas</u> , <u>V. Lavastre</u> 17-20 septembre 2007 Lille, France 3 rd International Meeting: Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement Development of a new facility for dating old ground waters and ice cores using ⁸¹ Kr
	2.111	<u>B. Lavielle</u> , <u>E. Gilabert</u> , <u>B. Thomas</u> 13-17 août 2007 Tucson, AZ, USA 70 th Annual Meetings of the Meteoritical Society A new facility for the determination of cosmic ray exposure ages in small extraterrestrial samples by using ⁸¹ Kr-Kr dating method <i>Meteoritics & Planetary Science</i> 42, A92 (2007)
	2.112	Ammon, K. Leya, I., <u>Lavielle, B.</u> , <u>Gilabert, E.</u> , David, J. C., and Michel, R. 13-17 août 2007 Tucson, AZ, USA 70 th Annual Meetings of the Meteoritical Society Cross sections of the production of He, Ne, and Ar isotopes by proton-induced reactions on iron and nickel. <i>Meteoritics & Planetary Science</i> 42, A13 (2007)
	2.113	<u>Lavielle Bernard</u> , <u>Gilabert Eric</u> , <u>Thomas Bertrand</u> 6-11 août 2006 Zürich, Suisse 70 th Annual Meetings of the Meteoritical Society Development of a New Resonance Ionization Mass Spectrometer for the Isotopic Analysis of Kr and Xe <i>Meteoritics & Planetary Science</i> 41 (2006) A104
	2.114	<u>B. Lavielle</u> , <u>V. Lavastre</u> , <u>E. Gilabert</u> , <u>B. Thomas</u> , N. Thonnard, K. Ocker 14-18 mars 2005 Tours, France 2 nd International Meeting on Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement Old groundwater dating with krypton by using RIS-TOF facility. Abstracts volume 389-390
	2.115	<u>V. Lavastre</u> , <u>B. Lavielle</u> , <u>E. Gilabert</u> , <u>B. Thomas</u> , <u>S. Giannesini</u> 14-18 mars 2005 Tours, France 2 nd International Meeting on Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement Paleoclimatic approach for groundwater dating of the Oxfordian and Dogger aquifers (eastern part of the

		Paris basin, France). Abstracts volume 465-466
ACTN	2.116	<u>E. Gilibert, B. Lavielle</u> , T. Sauvage, P. Garcia, G. Carlot, C. Viaud 10-11 décembre 2008 Paris, France Journées Plénières du GDR GEDEPEON - Bilan des actions soutenues 2008 Étude du comportement de l'hélium dans le molybdène.
	2.117	<u>B. Lavielle, E. Gilibert, B. Thomas, V. Lavastre, T. Smith</u> 10 septembre 2008 Orsay, France Journée Plénière du GNR FORPRO Étude de la diffusion des gaz rares dans les formations argileuses des sites de Meuse/Haute-Marne et de Mont Terri et datation des eaux souterraines à l'aide du ^{81}Kr .
	2.118	<u>Bernard Lavielle, Eric Gilibert, Bertrand Thomas</u> 8-9 septembre 2008 Strasbourg, France 11 ^{èmes} Journées Nationales de Radiochimie et Chimie Nucléaire Développement d'un nouvel instrument pour la mesure des isotopes radioactifs ^{81}Kr (229 000 ans) et ^{85}Kr (10,73 ans) et applications
	2.119	<u>E. Gilibert, B. Lavielle</u> , T. Sauvage, G. Martin, P. Garcia, G. Carlot, C. Viaud 8-9 septembre 2008 Strasbourg, France 11 ^{èmes} Journées Nationales de Radiochimie et Chimie Nucléaire Désorption de ^3He dans UO_2 et Mo à basse fluence d'implantation.
	2.120	<u>E. Gilibert, B. Lavielle</u> , T. Sauvage, G. Martin, P. Garcia, G. Carlot, C. Viaud 27-28 mars 2008 Avignon, France Journées Plénières du GDR MATINEX Désorption de ^3He dans UO_2 et Mo à basse fluence d'implantation.
	2.121	C. Viaud, G. Carlot, N. Moncoffre, T. Sauvage, S. Maillard, <u>E. Gilibert</u> 16-17 octobre 2007 Tours, France Atelier Commun MATINEX-GEDEPEON Étude du comportement de l'hélium dans les liners métalliques (Mo) dédiés au combustible des réacteurs RCG
	2.122	<u>Bernard Lavielle, Bertrand Thomas, Eric Gilibert, Sophie Giannesini</u> 4-8 décembre 2006 Dijon, France Réunion des Sciences de la Terre (21 ^{èmes} RST) Caractérisation et évolution de l'EDZ par les gaz rares en paroi de galerie du laboratoire souterrain de recherche de Meuse / Haute Marne.
	2.123	<u>E. Gilibert, B. Lavielle</u> , T. Sauvage, P. Garcia 8-9 novembre 2006 Avignon, France Journées Plénières du GDR NOMADE Étude de UO_2 par Désorption Thermique couplée à la spectrométrie de masse des gaz rares
	2.124	<u>B. Lavielle, E. Gilibert, B. Thomas, V. Lavastre</u> 13 septembre 2006 LGGE St Martin d'Hères, France Réunion annuelle du Comité Glace France (CGF) Développement de la méthode de datation basées sur la mesure de ^{81}Kr , ^{85}Kr par spectrométrie de masse RIS-TOF
	2.125	B. Lavielle, <u>B. Thomas, E. Gilibert, S. Giannesini</u> 7-8 septembre 2006 Avignon, France 10 ^{èmes} Journées Nationales de Radiochimie et de Chimie Nucléaire Caractérisation et évolution de l'EDZ par les gaz rares en paroi de galerie du laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne.
	2.126	<u>E. Gilibert, B. Lavielle</u> , T. Sauvage, P. Garcia 7-8 septembre 2006 Avignon, France 10 ^{èmes} Journées Nationales de Radiochimie et de Chimie Nucléaire Étude de UO_2 par Désorption Thermique couplée à la spectrométrie de masse des gaz rares
	2.127	<u>Bernard Lavielle, Véronique Lavastre, Bertrand Thomas, Eric Gilibert</u> 15-19 mai 2006 La Grande Motte, France 6 ^{èmes} Journées Scientifiques de Marcoule Développement méthodologique innovant pour la datation des eaux souterraines avec les chronomètres radioactifs ^{81}Kr - ^{85}Kr .
	2.128	<u>B. Lavielle, B. Thomas, E. Gilibert, S. Giannesini</u> 2-4 mai 2006

		La Grande Motte, France IVe colloque du GdR FORPRO 2006: Bilan 2004-2005 et Prospective post 2007 du GdR FORPRO Caractérisation et évolution de l'EDZ par les gaz rares en paroi de galerie du laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne
	2.129	<u>B. Lavielle, E. Gilabert, B. Thomas, V. Lavastre</u> 2-4 mai 2006 La Grande Motte, France IVe colloque du GdR FORPRO 2006: Bilan 2004-2005 et Prospective post 2007 du GdR FORPRO Développement de la méthode de datation des eaux souterraines basées sur la mesure de ^{81}Kr et ^{85}Kr par spectrométrie de masse RISTOF : progrès et perspectives
COM	2.130	<u>B. Lavielle, E. Gilabert, B. Thomas</u> 13 mai 2009 Paris, France Colloque du Groupe CGF « Carottes de Glace France » Datation à l'aide des isotopes radioactifs ^{81}Kr (229 000 ans) et ^{85}Kr (10,77 ans).
	2.131	<u>B. Lavielle, B. Thomas</u> 18-19 décembre 2008 St-Ursanne, Suisse Mont Terri Technical Meeting February Characterization of EDZ: noble gas data.
	2.132	<u>B. Lavielle, B. Thomas, E. Gilabert</u> 23 septembre 2008 St Ursanne, Suisse Worshop EZG-08 project Noble gas analysis (diffusion through EDZ)
	2.133	<u>Lavielle B.</u> 12-13 décembre 2007 Pau, France Séminaire ANR « Captage et Stockage du CO_2 »